DOI: 10.5846/stxb201608181693
李丽娟,张吉,吴丹,殷旭旺,徐宗学,张远.太子河流域鱼类功能群结构与多样性对土地利用类型的响应.生态学报,2017,37(20):6863-6874.
Li L J, Zhang J, Wu D, Yin X W, Xu Z X, Zhang Y.Relationships between structure and diversity of fish functional groups and land use in the Taizi River.Acta Ecologica Sinica,2017,37(20):6863-6874.

太子河流域鱼类功能群结构与多样性对土地利用类型的响应

李丽娟[1],张　吉[1],吴　丹[1],殷旭旺[1,*],徐宗学[2],张　远[3]

1 大连海洋大学水产与生命学院,辽宁省水生生物学重点实验室,大连　116023
2 北京师范大学水科学研究院,北京　100875
3 中国环境科学研究院,环境基准与风险评估国家重点实验室,流域水生态保护技术研究室,北京　100012

摘要:研究河岸带土地利用方式对河流生物群落的影响对河岸带管理和河流生态系统修复至关重要。研究了太子河河岸带的土地利用类型(森林用地、森林耕作用地、耕地和城镇建设用地)和鱼类功能群的关系,结果表明:栖息地质量参数在不同土地利用类型内具有显著差异,森林用地区电导率、总溶解固体、淤泥和底质含沙量比例的平均值均较低,分别为(105.05 μs/cm、80.38 mg/L、65.00 mL 和 0%),底质类型以石块为主;耕作区的水深、流量和淤泥的平均值均是最高(186.83 m、80.11 m^3 和 5333.33 mL),底质类型以沙质和淤泥为主。太子河流域鱼类功能群划分为 5 种类型(18 个亚类),在不同土地利用类型内具有差异显著,森林用地内的鱼食性、石块栖功能群、昆虫食性和黏性卵功能群的比例最高;森林耕作用地内的植食性和底层栖功能群的比例最高;耕地内的沙栖功能群、中下层栖功能群和筑巢产卵功能群的比例最高;城镇建设用地内的淤泥栖功能群、耐污种、中下层栖功能群和杂食性功能群的比例最高。研究显示,栖息地评价得分高、栖境复杂的区域其个体数量较高,而栖息地得分低、底质类型以淤泥为主的区域其个体数量较低。

关键词:土地利用类型;功能群;环境因子;鱼类;群落结构

Relationships between structure and diversity of fish functional groups and land use in the Taizi River

LI Lijuan[1], ZHANG Ji[1], WU Dan[1], YIN Xuwang[1,*], XU Zongxue[2], ZHANG Yuan[3]

1 *Liaoning Provincial Key Laboratory for Hydrobiology, College of Fisheries and Life Science, Dalian Ocean University, Dalian* 116023, *China*
2 *College of Water Science, Beijing Normal University, Beijing* 100875, *China*
3 *Laboratory of Riverine Ecological Conservation and Technology, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing* 100012, *China*

Abstract: Understanding the effects of land use on river biota is important for riverbank management and river ecosystem restoration. To assess the relationship between land-use change and the functional groups of fish communities, 40 sample sites were investigated in the Taizi River Basin, China, in May 2012. The results indicated that the dominant species of fish in the Taizi River Basin were *Phoxinus lagowskii*, *Nemachilus nudus*, *Abbottina rivularis*, and *Zacco platypus*, which accounted for 34.6%, 5.3%, 5.4%, and 7.3% of the total fish, respectively. In addition, we observed some rare species such as *Lampetra morii*, *Huigobio chinssuensis*, and *Hypseleotris swinhonis*. Canonical correspondence analysis showed that dissolved oxygen, index of substrate (IOS), electric conductivity, total dissolved solids, habitat evaluation score, and sediment concentration had stronger effects on the whole fish community than water pH, velocity, flow, and depth. One way

基金项目:辽宁省优秀人才支持计划项目(LR2015009);国家"水体污染控制与治理"重大科技专项,流域水生态保护目标制定技术研究课题(2012ZX07501-001)

收稿日期:2016-08-18;　　**网络出版日期**:2017-06-01

* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: yinxuwang@dlou.edu.cn

ANOVA analysis revealed that the habitat characteristics exhibited significant differences among the four land use types. In sample sites with forest land use type, conductivity, total dissolved solids, and sediment sand composition were 105.05 μs/cm, 80.38 mg/L, 65.00 ml, and 0.00, respectively, which were lower than those of other sample sites. Water depth, flow rate, and the average percentage of silt were highest in sample sites with farmland as main land use type, which were 186.83 m, 80.11 m^3, and 5333.33 mL, respectively. Functional groups of fish were divided into five types (18 subcategories), with significant differences among the four land use types. The percentages of piscivores, stones, feeding insects, and sticky eggs were highest in sample sites with forest as main land use type, whereas the percentages of herbivores and their underlying functional groups were highest in the forest and farmland mixing zone. The percentages of sand, middle water layer, and nesting functional group were higher in sample sites with farmland as main land use type, and the percentages of silt, tolerance to pollution, lower water layer, omnivorous species were higher in sample sites with urban as main land use type. This study showed that the number of individuals of fish was positively correlated with the habitat quality and was negatively correlated with the roughness of sediment type. Different types of land use can lead to changes in the water environment, which in turn can result to changes in the functional groups of fish communities. The habitat quality of forest land and the combination of forest and farmland was the best at maintaining the integrity of fish community structure. Therefore, for land use planning, it is necessary to consider forest land and the combination of forest and farmland.

Key Words: land use type; functional groups; environmental factors; fish; community structure

随着人口数量的不断增加,密集的人类活动在很大程度上导致了河流生态环境的不断恶化,特别是河岸带土地利用类型的改变,严重影响了河流生态系统中的水文过程、水环境承载力以及水环境质量,使得河流生境栖息地质量受到严重威胁[1-3]。而河流生境栖息地质量与河流中的水生生物密切相关,是水生生物生存与繁衍的重要保证[4],因此合理规划河岸带土地利用类型和方式,提高河流生境栖息地质量,对维持水生生物群落结构的复杂性和完整性具有重要意义[5]。

频繁的人类活动使得河岸带土地利用类型发生重大改变,最为明显的特征即为森林用地面积不断减少,农业和城镇用地面积不断增加[2],这些改变均会对栖息地的复杂性和异质性产生影响,进而使得水生生物群落结构发生改变[6]。有研究表明,植被丰富茂盛的河岸带可以提高河岸的耐腐蚀性、减少坡面径流、为水生生物提供庇护所[7-9]。在栖息地环境比较单一的农业用地或城镇用地为主的河岸带,富营养化以及水土流失现象十分严重,威胁着水生生物的生存和繁衍[10],而在栖息地环境比较复杂的森林用地,水生生物的生物量和多样性则相对较高[11]。例如对太子河河岸带不同土地利用类型下硅藻群落结构的研究表明,森林用地河岸带比农业用地或城镇用地河岸带具有更多的硅藻属数量、物种密度以及物种丰富度等[12]。

鱼类作为较高营养级水生生物,对于维持河流生态系统的稳定具有重要作用[13-14]。功能群是研究河流鱼类群落生态学的基础[15],基于鱼类对不同生态环境响应的功能[16-17],能够体现出鱼类群落与栖息地环境的响应关系[18]。因此分析鱼类功能群的结构特征及其与栖息地环境的响应关系,可以较好的反应出河岸带土地利用类型的改变对鱼类群落产生的影响。Wu 等人[11]研究表明在渭河流域人类干扰对鱼类群落结构和功能群有较大影响,在受人类干扰强度较大的农业用地,其鱼类物种丰度、多样性、耐受性和稀有物种数量均较低,功能群的多样性也随之下降。Poff 等人[19]的研究表明,在水文特征不稳定且生境差异较大的河流比生境较稳定的河流具有更多的鱼类功能群。

太子河流域人类活动梯度较为明显,上游地区多为森林用地,人类活动较小,随着海拔梯度的逐渐降低,人类活动强度增加,农业用地和城镇用地比例逐渐增高,河岸带土地利用类型发生明显改变[12]。本文选取太子河流域为研究对象,调查分析流域内河岸带土地利用类型、水环境质量、鱼类群落结构特征以及鱼类功能群特征,其目的是判别河岸带土地利用类型的改变对水环境以及鱼类群落造成的影响,提出河岸缓冲区的合理

土地利用方式,为当地环境保护机构进行有效的河岸管理和鱼类保护提供确切依据。

1　材料与方法

1.1　研究区域

太子河流域(122°30′—124°50′E、40°30′—41°40′N)位于我国辽宁省东部,干流全长 413 km,流域面积 13880 km^2,属于温带季风气候,年内温差较大,降雨多集中在 6—8 月,占全年总降雨量的 71.2%;水系发源于辽宁省新宾县境内的长白山脉,向西流经本溪、辽阳、鞍山三市,在三岔河与浑河汇合形成大辽河后至营口注入渤海[20](图 1)。太子河流域 4 种土地利用类型的划分(森林用地、森林耕作用地、耕地和城镇用地)参照李丽娟等[12]。

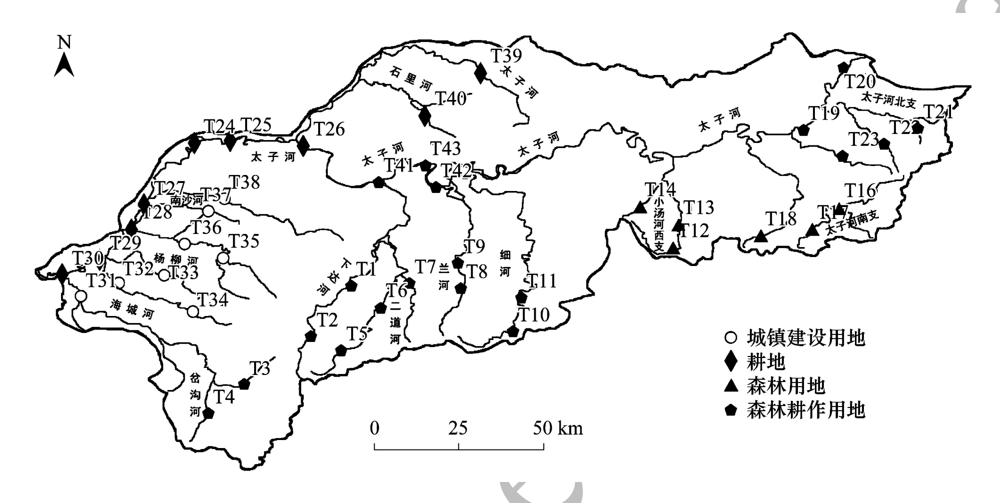


图 1　太子河河岸带采样点分布

Fig.1　Location of sampling sites of Taizi River Riparian

1.2　数据收集

1.2.1　鱼类样品收集

于 2012 年 5 月,对太子河 4 种土地利用类型中的 40 个点位进行鱼类样品采集(图 1)。每个样点选用电鱼法和挂网法配合完成样品采集。对于可涉水(深弘水深≤1.5 m) 点位,只采用电鱼法进行采集。采样人员肩背安全电源,手持电极和抄网,沿采样站位上下游 400 范围内采集鱼类样品,采样时间维持在 30 min 左右。对于不可涉水(深弘水深≥1.5 m)点位,选用挂网法和电鱼法配合进行。电鱼法只在河岸边浅水区进行;挂网法是在深水区布设网具,挂网时间维持在 1 h 左右。使用的网具包括 3 种不同网径: 6 cm× 6 cm、12 cm× 12 cm、20 cm× 20 cm,以保证获得较为全面的鱼类样品。

样品采集后立即现场鉴定种类,鉴定后将鱼类样品放生。对于现场不能准确鉴定的样品,选取 5—10 尾形态完整、无鳞片脱落或损坏的,用纱布包裹制作标本,浸泡于密闭的盛有甲醛溶液样品保存盒中,带回实验室进一步鉴定。鉴定的参考文献为《辽宁省动物志:鱼类》[21]、《中国动物志硬骨鱼纲》[22]。

1.2.2　栖息地调查

栖息地评价方法根据相关文献[23-24],现场调查估计和实际测量太子河流域栖息地特征。流域内栖息地特征包括:栖息地评价得分(Qualitative Habitat Evaluation Score,QHES,包括河岸带、堤岸、河道状况等,)、水深(Depth)、流速(Velocity)、流量(Flow)、河宽(Width)、底质含沙量比例(Sand)、底质指数特征(IOS,巨砾>256 mm,鹅卵石 256 mm>64 mm,碎石 64 mm>4 mm,淤泥<4 mm)。IOS(Index of Substrate,底质指数)[25]计算公式:$IOS = 0.08\% V_{漂石} + 0.07\% V_{大卵石} + 0.06\% V_{小卵石} + 0.05\% V_{大圆石} + 0.04\% V_{小圆石} + 0.03\% V_{粗砾} + 0.02\% V_{细砾} + 0.01 V_{砂}$($V$ 为测量出不同底质类型的体积:(L))。流域内各采样站点水环境参数:pH、电导率(EC)、总溶解固体(TDS)、

溶解氧(DO)用水质分析仪(YSI Pro 2000)现场测定;水深和流速使用流速仪现场测定;底质含沙量用一套底质分样筛网(孔径分别为 16、8、4、2 mm 和 1 mm)测定。

1.2.3 土地利用类型特征

森林用地区主要分布在太子河上游源头南支,森林面积所占比例高,人类干扰程度较低或无,水质清澈,无异味。底质多为巨石、漂石和鹅卵石等激流生境,河流生境多样性高。

森林耕作用地区森林面积所占比例为 25%—50%,耕地面积所占比例为 25%—50%。由于受到人类干扰其植被遭到一定破坏,水质较为清澈,有少量异味。底质多为鹅卵石、细石和少量沙质,河岸两侧为森林和耕作土壤,堤岸稳定性较高,河流生境多样性较高。

耕作区主要分布在太子河中下游地区,耕地面积所占比例高于 75%,人类干扰程度较大,植被受到一定的人为破坏,水质较浑浊,有异味。底质主要以泥沙为主,底质含沙量比例约 100%,少数为碎石、鹅卵石,河岸两侧为耕作土壤,堤岸受到一定侵蚀,河流生境多样性较低。

城镇用地区主要分布于太子河下游地区,城镇建设用地面积所占比例高于 85%,人类干扰程度很大,河岸周围几乎无任何植被,水质浑浊,有大量刺激性气体溢出,底质以淤泥为主,河岸两侧为耕作废弃土壤层或建筑用地,堤岸受到严重侵蚀,河流生境多样性低。

1.3 数据分析

为了解土地利用类型、栖息地质量和鱼类群落功能群三者之间的关系,对 4 种土地利用类型下的栖息地特征和鱼类数据进行科学分析。采用物种数量、个体数量、Shannon-Wiener 多样性指数、Pielou 均匀度指数、敏感种鱼类个体百分百和耐污种鱼类个体百分百作为鱼类群落结构特征参数,根据相关文献[26],敏感种选取北方花鳅、拉氏鱥和马口鱼;耐污种选取鲫鱼、泥鳅、大鳞副泥鳅和麦穗鱼。

依据以往有关功能群的研究,根据鱼类的营养和食性[27]可将鱼类群落分为杂食性功能群、鱼食性功能群、植食性功能群、昆虫食性功能群和底栖动物食性功能群;根据鱼类对环境的容忍程度[28],将鱼类群落分为 3 类功能群:耐污功能群、中等耐污功能群和敏感功能群;由于鱼类所需的食物、遮蔽处和繁殖条件需要不同的河流底质[19],根据底质类型可将鱼类群落分为石块栖功能群、沙栖功能群和淤泥栖功能群 3 种鱼类功能群;根据产卵类型的不同可将鱼类群落分为 5 种鱼类功能群:黏性卵、浮性卵、沉性卵、筑巢产卵和特殊产卵功能群;根据鱼类栖息水层可将鱼类群落分为 3 种功能群:中上层栖功能群、中下层栖功能群和底层栖功能群。

将鱼类群落结构以及功能群和栖息地环境因子进行典范对应分析(canonical correspondence analysis, CCA);用 Pcord 5.0 进行多响应置换过程分析(multi-response permutation procedures, MRPP);用 BioDiversityPro 计算 Shannon-Wiener 多样性指数和 Pielou 均匀度指数;对不同土地利用方式下的栖息地质量参数和鱼类群落结构进行单因素方差分析,如果差异显著($P<0.05$)则进一步应用 Tukey HSD 检验不同土地利用方式下栖息地质量参数和鱼类群落结构的差异性,统计分析在 SPSS 17.0 软件包上进行;用 Origin 8.5 绘制不同土地利用类型下鱼类功能群的结构与多样性。

2 结果

2.1 太子河流域鱼类群落功能群

2.1.1 鱼类物种组成及其群落结构

太子河流域共采集到鱼类 28 种,分 4 目 9 科,共计 7987 尾(附录 1)。优势种为拉氏鱥(*Phoxinus lagowskii*)、北方条鳅(*Nemachilus nudus*)、棒花鮈(*Abbottina rivularis*)和宽鳍鱲(*Zacco Platypus*),分别占鱼类个体总数的 34.6%、5.3%、5.4%、和 7.3%。其中拉氏鱥为典型的敏感种,主要分布在河岸带以森林用地和森林耕作用地为主的水体中,棒花鮈和宽鳍鱲主要分布在河岸带以耕地和城镇建设用地为主的水体中。另外,此次还采集到东北七鳃鳗(*Lampetra morii*)、清徐胡鮈(*Huigobio chinssuensis*)、黄鱼幼(*Hypseleotris swinhonis*)等稀有物种[29],多采集于森林用地和森林耕作用地。多响应置换过程分析结果显示,太子河流域 4 种土地利用

类型之间的鱼类群落结构具有明显的空间异质性(P<0.001)。

单因素方差分析结果表明,鱼类群落中的个体数量在不同土地利用类型内具有显著差异(P<0.05)(表1),其平均值在森林用地最高,为 314.53;敏感种鱼类个体百分比在不同土地利用类型之间具有极显著差异(P<0.001),其中森林耕作用地最高,为 0.65;耐污种鱼类个体百分比和 Pielou 均匀度指数在不同土地利用类型之间具有极显著差异(P<0.001),其中在城镇建设用地最高,分别为 0.57 和 0.81。物种数量和 Shannon-Wiener 多样性指数在四种土地利用类型内没有差异(P>0.05)。

表 1　不同土地利用类型下的鱼类群落结构比较

Table 1　Comparison of fish assembles factors under different land use types

项目 Item	森林用地 Forest	森林耕作用地 Combination of forest and farmland	耕地 Farmland	城镇建设用地 Urban	P
物种数量 Number of species/种	7.63±0.63a	6.17±0.48a	8.11±0.95a	7.00±1.24a	0.536
个体数量 Number of individuals/尾	314.53±72.97d	148.83±33.08c	99.78±22.87b	36.67±12.77a	0.030
Shannon-Wiener 多样性指数	4.54±0.53a	3.65±0.36a	3.80±0.46a	2.53±0.59a	0.203
Pielou 均匀度指数	0.60±0.03a	0.58±0.09a	0.62±0.05a	0.81±0.50b	0.028
敏感种鱼类个体百分比 Percentage of tolerant individual	0.48±0.06b	0.65±00.07c	0.01±0.00a	0.00±0.00a	<0.001
耐污种鱼类个体百分比 Percentage of intolerant individual	0.04±0.01a	0.00±0.00a	0.51±0.10b	0.57±0.08b	<0.001

数据以平均值±标准误差形式表示,不同上标字母代表不同土地利用类型组间具有统计学显著差异,P<0.05

2.1.2　鱼类群落功能群的划分

太子河流域内鱼类功能群共划分为 5 种类型(18 个亚类)(表 2,附录 1),从营养结构各类功能群所占比例来看(图 2):鱼食性和昆虫食性功能群在森林用地的比例最高,植食性功能群在森林耕作用地的比例最高,杂食性功能群在耕地和城镇建设用地比例较高;从耐受性各类功能群所占比例来看:敏感种和中等耐污功能群在森林用地的比例最高,耐污种功能群在城镇建设用地的比例最高;从产卵类型各类功能群所占比例来看:黏性卵和特殊产卵功能群在森林用地比例最高,沉性卵功能群在森林耕作用地的比例最高,筑巢产卵功能群在耕地的比例最高,浮性卵功能群在城镇建设用地的比例最高;从栖息水层各类功能群所占比例来看:底层栖功能群在森林耕作用地的比例最高,中下层栖功能群在耕作用地的比例最高,中上层栖功能群在城镇建设用地的比例最高;从底质类型各类功能群所占比例来看:石块栖功能群在森林用地的比例最高,淤泥栖功能群在城镇建设用地的比例最高。在森林用地区共有 15 种鱼类功能群,在森林耕作用地区共有 16 种功能群,在耕地和城镇建设用地均有 18 种功能群,但敏感种功能群、石块栖功能群、植食性和昆虫食性功能群在耕地和城镇建设用地出现频率均较低。

表 2　太子河流域鱼类功能群组成

Table 2　Fuctional group composition of fish in the Taizi River Basin

耐受性 Tolerance to pollution	营养结构 Trophic guild	产卵类型 Reproductive guild	底质类型 Substrate type	栖息水层 Water location
耐污 High	杂食性	黏性卵	石块(鹅卵石,碎石)	中上层
中等耐污 Medium	鱼食性	浮性卵	沙	中下层
敏感 Low	植食性	沉性卵	淤泥	底层
	昆虫食性	筑巢产卵		
		特殊产卵		

2.2　太子河流域栖息地及其与鱼类群落功能群的相关性

2.2.1　全流域栖息地特征

单因素方差分析表明,除 pH 和流速外,不同土地利用类型下的栖息地特征具有极显著差异(P<0.001)

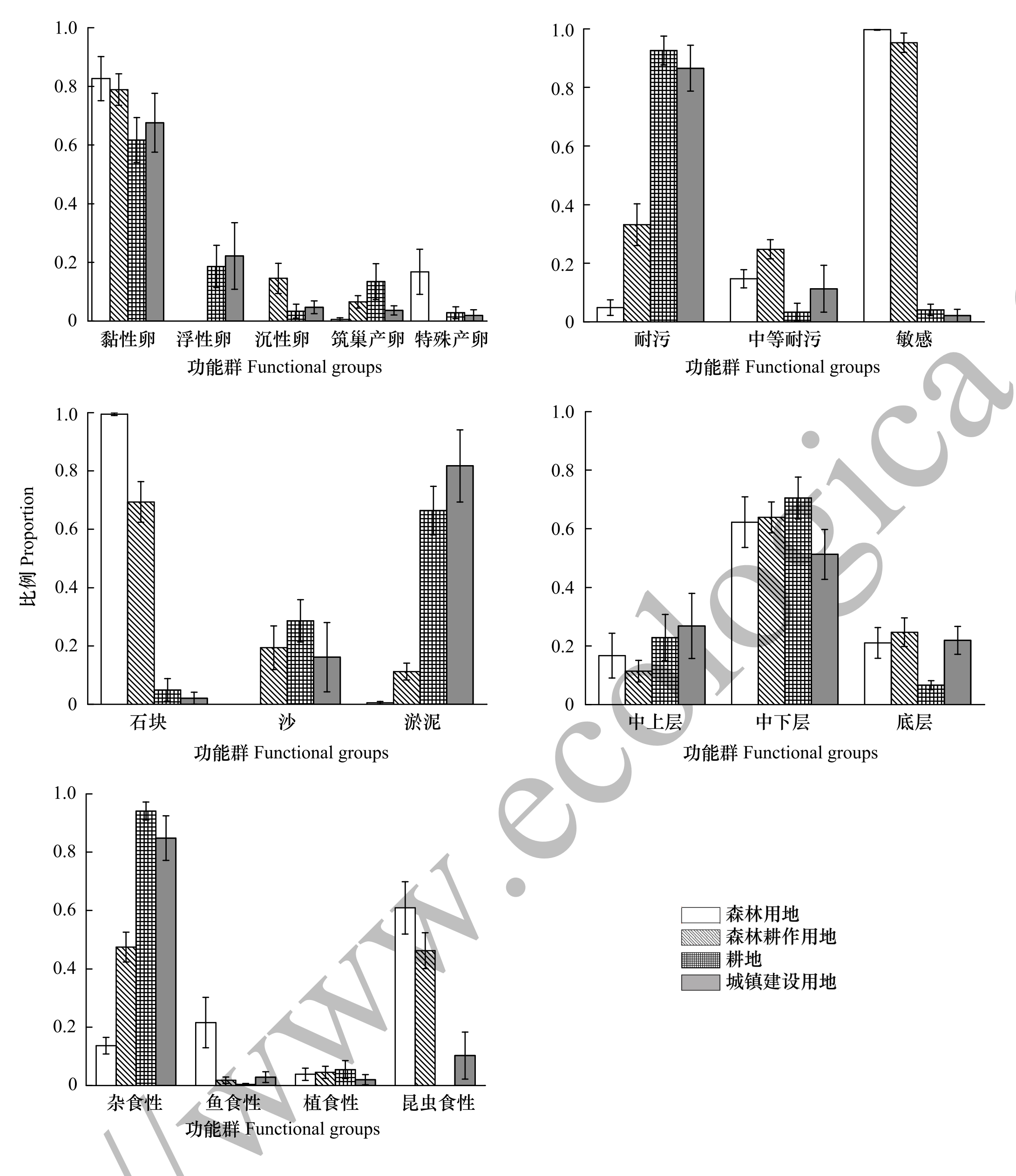


图 2 不同土地利用类型下鱼类功能群结构与多样性特征

Fig.2 Structure and diversity of fish functional groups under different land use types

(表 3)。其中森林用地区电导率、总溶解固体和底质含沙量比例的平均值均明显偏低,分别为 105.05、80.38 和 0.00;耕作区的水深和流量的平均值均是最高(186.83、80.11),溶解氧和 IOS 平均值却是最低(8.59、0.53);城镇建设用地区栖息地评价得分和 IOS 平均值最低(105.17 和 0.90),电导率和总溶解固体平均值最高,分别为 848.83 和 587.17。

2.2.2 鱼类群落结构与环境因子的相关性

CCA 结果显示(图 3),溶解氧、IOS、电导率、总溶解固体、栖息地评价得分和底质含沙量对整个鱼类群落的驱动能力强于 pH、流速、流量和水深。溶解氧和 IOS 是森林耕作区河流鱼类群落的主要驱动因子($P<0.05$);栖息地评价得分和 IOS 是森林用地区河流鱼类群落的主要驱动因子($P<0.05$);总溶解固体、底质含沙量和电导率是耕作区河流鱼类群落的主要驱动因子($P<0.05$)。不同土地利用类型受溶解氧、IOS、电导率、总溶解固体、栖息地评价得分和底质含沙量的影响不同,这六类环境因子对太子河流域鱼类群落均具有显著影响。

表 3　不同土地利用类型下的栖息地特征比较

Table 3　Comparison of habitat factors under different land use types

项目 Item	森林用地 Forest	森林耕作用地 Combination of forest and farmland	耕地 Farmland	城镇建设用地 Urban	*P*
pH	9.07±0.08a	8.81±0.10)a	8.46±0.31)a	8.44±006)a	0.112
电导率 Electric conductivity /(μs/cm)	105.05±15.94a	337.49±17.45b	513.43±27.93c	848.83±122.03d	<0.001
溶解氧 Dissolved oxygen /(mg/L)	10.23±0.47c	11.14±0.35d	8.59±0.25a	9.57±0.40b	<0.001
河宽 Width /m	13.00±2.40a	35.28±11.03c	91.61±18.10c	8.84±2.12a	0.001
总溶解固体 Total dissolved solids /(mg/L)	80.38±12.60a	247.93±12.95b	368.27±16.11c	587.17±85.00d	<0.001
水深 Depth /m	26.68±2.87a	18.53±1.59a	186.83±44.61b	29.58±4.24a	<0.001
流速 Velocity /(m/s)	0.35±0.06a	0.55±0.05a	0.41±0.07a	0.48±0.04a	0.092
流量 Flow /(m^3/s)	1.11±0.22a	4.12±1.79b	80.11±22.92c	1.20±0.26a	<0.001
底质指数 Index of substrate	10.05±0.83c	5.93±0.65b	0.53±0.09a	0.90±0.18a	<0.001
底质含沙量 Sand /%	0.00±0.00a	0.02±0.00a	1.00±0.00c	0.35±0.21b	<0.001
栖息地评价得分 Qualitative habitat evaluation score	176.00±6.52c	130.26±4.68b	110.44±3.68a	105.17±10.06a	<0.001

数据以平均值±标准误差形式表示.不同上标字母代表不同土地利用类型组间具有统计学显著差异,*P*<0.05

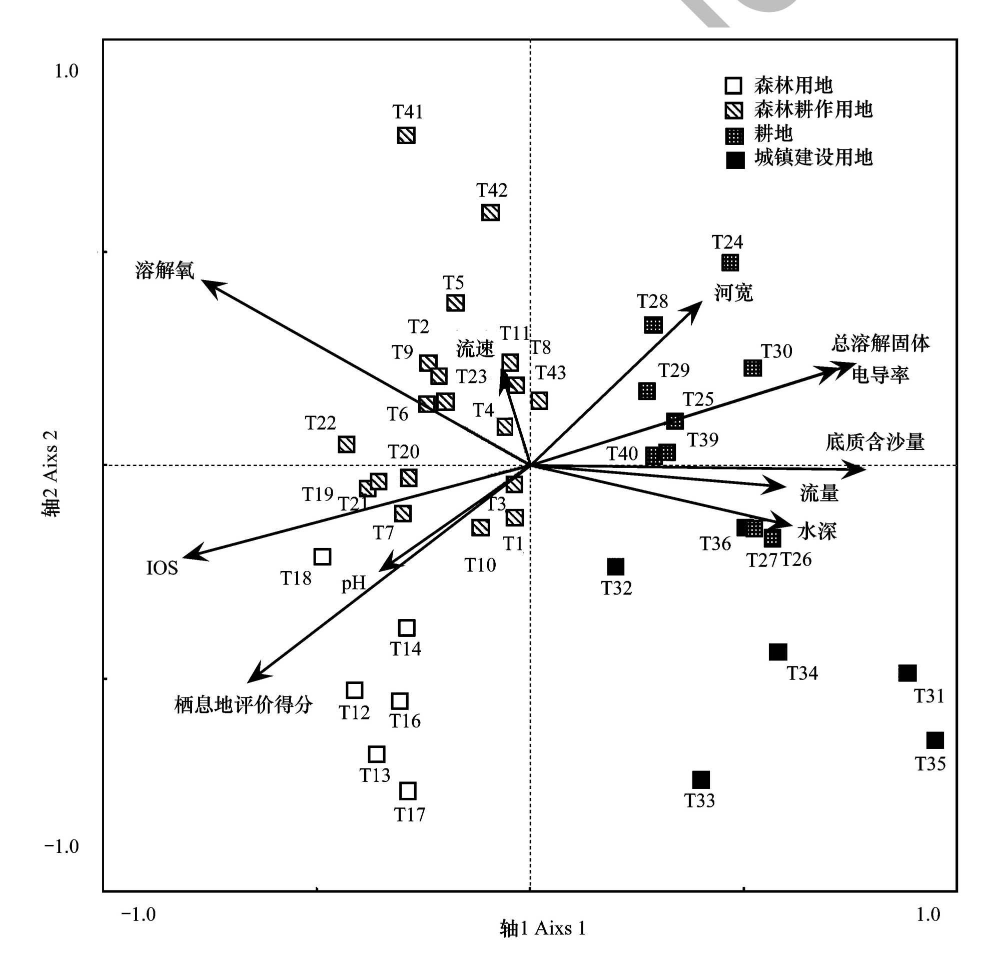


图 3　太子河流域鱼类群落结构与环境因子的典范对应分析

Fig.3　Canonical correspondence analysis of species-environmental relationships in Taizi River Basin

2.2.3　鱼类群落功能群和栖息地之间的相关性

太子河流域鱼类群落功能群与栖息地环境因子的典范对应分析结果表明(图 4):总溶解固体和电导率是

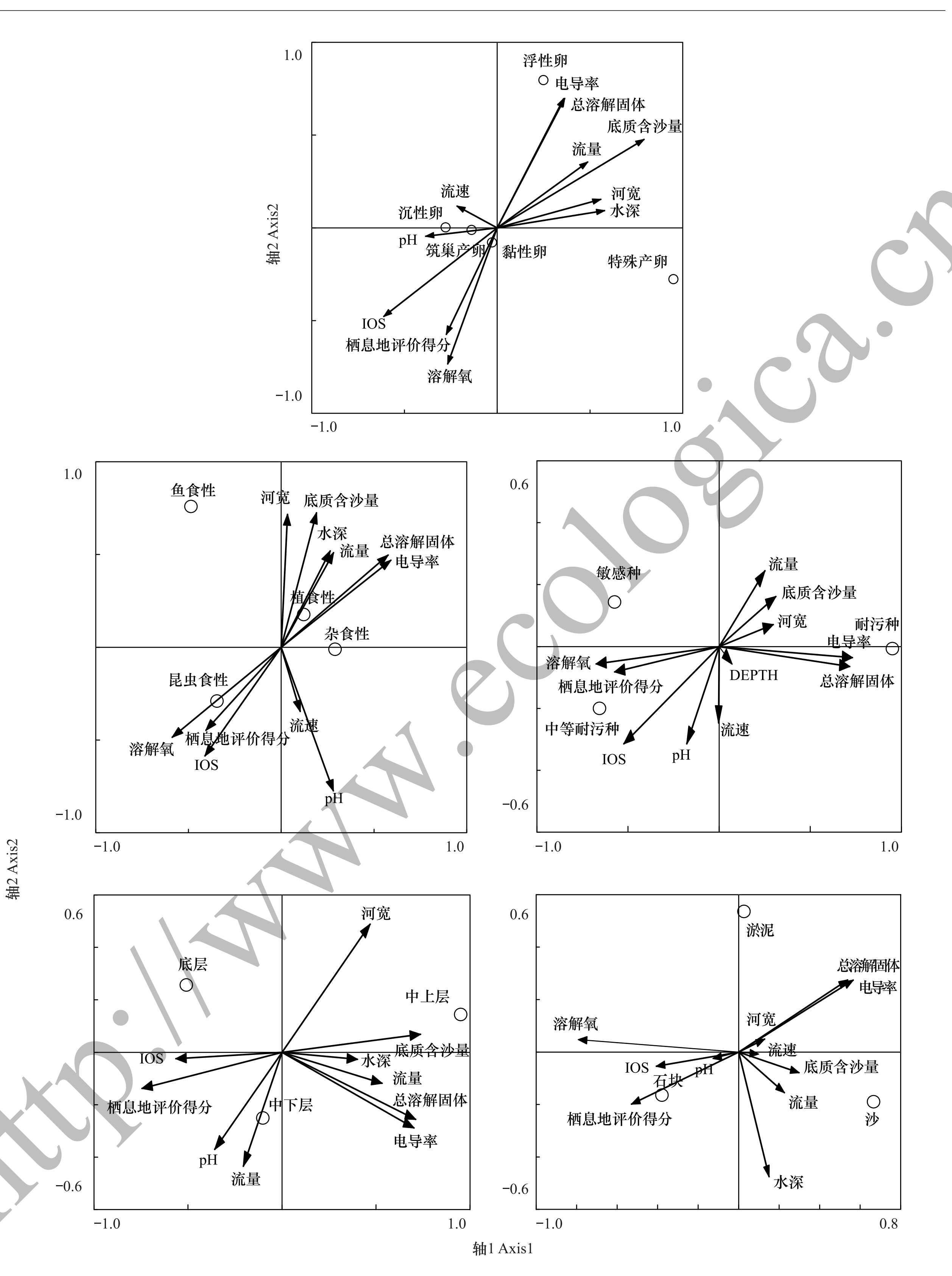


图 4　太子河流域鱼类功能群和栖息环境地因子之间的相关性

Fig.4　Concordance correlations between fish functional groups and habitat factors in Taizi River Basin

浮性卵功能群的驱动因子(P<0.05),溶解氧是黏性卵功能群的驱动因子;溶解氧和 IOS 是昆虫食性功能群的驱动因子(P<0.05),杂食性功能群受总溶解固体和电导率的影响;中上层栖功能群和中下层栖功能群受底质

含沙量和流量驱动;敏感种和中等耐污功能群主要受溶解氧、IOS 的影响,耐污种功能群受总溶解固体和电导率的影响;底质含沙量是沙栖功能群和石块栖功能群的驱动因子($P<0.05$)。

3　讨论

研究表明,流域内栖息地质量对鱼类群落功能群有着重要影响,尤其是河流底质类型[6]。底质变化影响着食物和底层鱼类生境的变化,进而引发了鱼类功能群的改变。在太子河流域上游的森林用地多分布鱼食性功能群和敏感种功能群(图 4),其物种主要为喜清洁水体的拉氏鱥等,这主要由于当地以旅游发展为主,对生境污染较小,水体清洁,河流底质类型以石块为主;而在太子河下游的耕作用地多分布耐污种功能群和淤泥栖功能群,其代表物种为耐污性较强的鲫(*Carassius auratus*)或泥鳅(*Misgurnus anguillicaudatus*)等,主要由于人类活动的干扰,引起入河污染物和颗粒物的增加,水质浑浊,河流底质类型以淤泥为主,这与 Goldstein[30] 和 Putman[31] 等人研究相一致。不同土地利用类型间的底质类型的明显不同说明该流域内河流的生境差异较大[32],从而导致鱼类功能群的显著差异。

多响应置换过程分析结果显示,太子河流域 4 种土地利用类型之间的鱼类群落结构具有明显的空间异质性,这可能是由于河岸带具有不同的土地利用类型所致。例如在上游的森林用地区,植被覆盖面积大,人类干扰较小,其水质相对较好,电导率和总溶解固体最低,溶解氧和 IOS 均较高(表 3),鱼类个体数量和敏感鱼类个体百分百均是最高(表 1)。而在太子河下游地区,人口聚集,耕作用地和城镇建设用地比例较大,对河流污染较严重,电导率和总溶解固体高,底质以淤泥为主(表 3),鱼类个体数量较少,耐污种鱼类个体百分比高(表 1)。其他有关太子河流域鱼类群落结构的研究结果也表明太子河上游地区以自然用地类型为主,河岸带栖息地质量较好,与鱼类 F-IBI 指数呈正相关,下游地区则以农业用地和城镇用地为主,河岸带栖息地质量较差,与鱼类 F-IBI 指数呈负相关[33]。

太子流域鱼类群落结构与环境因子的典范对应分析结果表明,IOS、溶解氧、栖息地评价得分、电导率、底质含沙量等是影响鱼类群落结构的主要因子,这与丁森等人[24,34]关于太子河流域鱼类群落结构与环境因子关系的研究结果较为一致。而对渭河流域鱼类群落结构的有关研究表明[14],影响其群落结构的主要环境因子是海拔高度、溶解氧含量、流速、高锰酸盐指数、砂/淤泥/粘土和草地所占比例,这可能是由于地形、气候和河岸带土地利用类型的差异性所致。

生态系统中生物群落的功能群组成具有稳定性[15],对鱼类进行功能群的划分,可简化鱼类群落的研究方法。Poff 等人[19]研究了水文特征对鱼类功能群的影响,结果表明激流环境生态系统比稳定河流具有更多种营养结构、生境、底质类型和耐受种。太子河流域鱼类功能群划分为 5 种类型(18 个亚类),在森林用地区共有 15 种鱼类功能群,在森林耕作用地区共有 16 种,在耕地和城镇建设用地均有 18 种。由于敏感种、石块栖功能群、植食性和昆虫食性等多分布于清洁水质和复杂生境的功能群在耕地和城镇建设用地出现频率均较低[19],但沙栖功能群、浮性卵和沉性卵等多分布于浑浊水体且生境较为单一的功能群在森林用地或森林耕作用地的出现频率为零,因此耕地和城镇建设用地鱼类功能群的多样性较高。其中杂食性功能群主要受总溶解固体和电导率驱动,在耕地和城镇建设用地的比例较高,如麦穗鱼(*Pseudorasbora parva*)和鲫等;黏性卵功能群受栖息地质量、溶解氧和 IOS 驱动,在森林用地和森林耕作用地的比例较高;中上层栖功能群受底质含沙量驱动,在城镇建设用地的比例最高;耐污种功能群主要受电导率和总溶解固体影响,在城镇建设用地的比例最高;石块栖功能群受 IOS 和栖息地质量影响,在森林用地的比例最高。这主要由于流经森林用地和森林耕作用地的水体中杂草较多,底质类型复杂,有利于黏性卵的附着,如北方花鳅(*Cobitis granoei*)等;且森林用地区水质清澈,溶解氧较高[33],有利于昆虫食性和敏感种功能群生存,例如花杜父鱼(*Cottus linnaeus*)、拉氏鱥等;而在耕地和城镇建设用地,由于人类生活垃圾和工业废水的排放,离子浓度高,水体多呈富营养状态,鱼类食物来源较为丰富[24],因此杂食性和耐污种鱼类比较高,例如宽鳍鱲和棒花鱼(*Abbottina rivularis*)等。

研究表明,土地利用类型的不同会导致栖息地特征发生改变[35],而栖息地的复杂性影响着鱼类群落功能

群[36]。Boet 等人[37]研究指出流域内人类开发土地利用方式比例的增加会导致鱼类多样性和丰度水平的下降,而耐污种鱼类的相对丰度则相应上升,这和本文研究结果较为相近。敏感种功能群在森林用地最高,城镇建设用地最低;而耐污种功能群在森林用地最低,其次是森林耕作用地和农业用地,而在城镇建设用地最高。尤其像东北七鳃鳗和清徐胡鮈等一些珍稀鱼类,因其生于清洁水体和复杂生境中,此次只在森林用地或森林耕作用地采集到标本。太子河流域内具有不同的土地利用类型,从太子河源头的森林用地到下游的城镇用地,鱼类群落结构具有显著差异性,鱼类数量呈阶梯式递减。因此,为保护鱼类的生存和繁衍,保持鱼类群落结构的完整性,相关河流流域在进行河岸带管理时应考虑森林用地为主,森林耕作用地为辅的规划目标,例如上游地区河岸带应以森林用地为主,中下游地区河岸带应相应地减少耕地和城镇建设用地面积,增加森林用地面积。

4 结论

太子河流域共采集到鱼类 28 种,分 4 目 9 科,共计 7987 尾,鱼类功能群共划分为 5 种类型(18 个亚类)。其中鱼食性、敏感种、黏性卵和昆虫食性功能群在森林用地的比例最高,植食性、底层、沉性卵功能群在森林耕作用地的比例最高,杂食性、筑巢产卵功能群在耕地的比例最高,淤泥、耐污种、中上层功能群在城镇建设用地的比例最高。土地利用类型的不同会导致水环境发生改变,进而影响到鱼类群落功能群的变化。森林用地和森林耕作用地内的栖息地质量较好,能够很好的保持鱼类群落结构的完整性,在进行河岸带土地利用类型规划时应考虑森林用地为主,森林耕作用地为辅的规划目标。

参考文献(References):

[1] Walters D M, Roy A H, Leigh D S. Environmental indicators of macroinvertebrate and fish assemblage integrity in urbanizing watersheds. Ecological Indicators, 2009, 9(6): 1222-1233.

[2] Newbold T, Hudson L N, Hill S L, Contu S, Lysenko I, Senior R A, Börger L, Bennett D J, Choimes A, Collen B, Day J, De Palma A, Díaz S, Echeverria-Londoño S, Edgar M J, Feldman A, Garon M, Harrison M L, Alhusseini T, Ingram D J, Itescu Y, Kattge J, Kemp V, Kirkpatrick L, Kleyer M, Correia D L, Martin C D, Meiri S, Novosolov M, Pan Y, Phillips H R, Purves D W, Robinson A, Simpson J, Tuck S L, Weiher E, White H J, Ewers R M, Mace G M, Scharlemann J P, Purvis A. Global effects of land use on local terrestrial biodiversity. Nature, 2015, 520 (7545): 45-50.

[3] Allan J D. Landscapes and riverscapes: the influnce of land use on stream ecosystems. Annual Review of Ecology, Evolution and Systematics, 2004, 35(1): 257-284.

[4] Zhao C S, Yang S T, Liu C M, Dou T W, Yang Z L, Yang Z L, Liu X L, Xiang H, Nie S Y, Zhang J L, Mitrovic S M, Yu Q, Lim R P. Linking hydrologic, physical and chemical habitat environments for the potential assessment of fish community rehabilitation in a developing city. Journal of Hydrology, 2015, 523: 384-397.

[5] Bellmore J R, Baxter C V, Ray A M, Denny L, Tardy K, Galloway E. Assessing the potential for salmon recovery via floodplain restoration: a multitrophic level comparison of dredge-mined to reference segments. Environmental Management, 2012, 49(3): 734-750.

[6] Heitke J D, Pierce C L, Gelwicks G T, Simmons G A, Siegwarth G L. Habitat, land use, and fish assemblage relationships in Iowa streams: preliminary assessment in an agricultural landscape. American Fisheries Society Symposium, 2006, 48: 287-303.

[7] Simonson T D, Lyons J, Kanehl P D. Guidelines for evaluating fish habitat in Wisconsin streams. U S. Forest Service, General Technical Report NC-164, St. Paul, Minnesota, 1994.

[8] Mills K E, Stevenson N J. Riparian vegetation// Bain M B, Stevenson N J, eds. Aquatic Habitat Assessment: Common Methods. Bethesda, Maryland: American Fisheries Society, 1999: 125-134.

[9] Stevenson N J, Mills K E. Streambank and shoreline condition//Bain M B, Stevenson N J, eds. Aquatic Habitat Assessment: Common Methods. Bethesda, Maryland: American Fisheries Society, 1999: 115-124.

[10] Li H B, Reynolds J F. A simulation experiment to quantify spatial heterogeneity in categorical maps. Ecology, 1994, 75(8): 2446-2455.

[11] Wu W, Xu Z X, Kennard M J, Yin X W, Zuo D P. Do human disturbance variables influence more on fish community structure and function than natural variables in the Wei River basin, China? Ecological Indicators, 2016, 61: 438-446.

[12] 李丽娟, 金文, 王博涵, 项珍龙, 殷旭旺, 徐宗学, 张远. 太子河河岸带土地利用类型与硅藻群落结构的关系. 环境科学研究, 2015, 28

(11): 1662-1669.

[13] Matthews W J. Fish faunal 'breaks' and stream order in the eastern and central United States. Environmental Biology of Fishes, 1982, 17(2): 81-92.

[14] Wu W, Xu Z X, Yin X W, Zuo D P. Assessment of ecosystem health based on fish assemblages in the Wei River basin, China. Environmental Monitoring and Assessment, 2014, 186(6): 3701-3716.

[15] Karr J R, Fausch K D, Angermeier P L, Yant P R, Schlosser I J. Assessing Biological Integrity in Running Water: A Method and Its Rational. Champaign, IL: Illinois Natural History Survey, 1986.

[16] Livingston R J. Trophic organization of fishes in a coastal seagrass system. Marine Ecology Progress Series, 1982, 7: 1-12.

[17] Reum J C P, Essington T E. Seasonal variation in guild structure of the Puget Sound demersal fish community. Estuaries and Coasts, 2008, 31(4): 790-801.

[18] Hoeinghaus D J, Winemiller K O, Layman C A, Arrington D A, Jepsen D B. Effects of seasonality and migratory prey on body condition of *Cichla* species in a tropical floodplain river. Ecology of Freshwater Fish, 2006, 15(4): 398-407.

[19] Poff N L, Allan J D. Functional organization of stream fish assemblages in relation to hydrological variability. Ecology, 1995, 76(2): 606-627.

[20] 殷旭旺, 渠晓东, 李庆南, 刘颖, 张远, 孟伟. 基于着生藻类的太子河流域水生态系统健康评价. 生态学报, 2012, 32(6): 1677-1691.

[21] 刘蝉馨, 秦克静, 史为良. 辽宁省动物志 鱼类. 沈阳: 辽宁省科学技术出版社, 1987.

[22] 陈宜瑜. 中国动物志 硬骨鱼纲. 北京: 科学出版社, 1998.

[23] Cook N A, Sarver E A, Krometis L H, Huang J. Habitat and water quality as drivers of ecological system health in Central Appalachia. Ecological Engineering, 2015, 84: 180-189.

[24] 丁森, 张远, 渠晓东, 孔维静, 刘思思, 孟伟. 影响太子河流域鱼类空间分布的不同尺度环境因子分析. 环境科学, 2012, 33(7): 2272-2280.

[25] Allan J D, Castillo M M. Stream Ecology: Structure and Function of Running Waters. 2nd ed. The Netherlands: Springer, 2007.

[26] 裴雪姣, 牛翠娟, 高欣, 徐琛. 应用鱼类完整性评价体系评价辽河流域健康. 生态学报, 2010, 30(21): 5736-5746.

[27] Becker G C. Fishes of Wisconsin. Madison, Wisconsin, USA: University of Wisconsin Press, 1983.

[28] Ohio EPA. Biological Criteria for the Protection of Aquatic life: Volume Ⅲ. Standardized Biological Field Sampling and Laboratory Methods for Assessing Fish and Macroinvertebrate Communities. Ohio EPA Technical Report EAS/2015-06-01. Columbus, Ohio, USA: Ohio Environmental Protection Agency Division of Water Quality Monitoring and Assessment, 1989.

[29] 王伟, 王冰, 何旭颖, 渠晓东, 张远. 太子河鱼类群落结构空间分布特征. 环境科学研究, 2013, 26(5): 494-501.

[30] Goldstein R M, Wang L Z, Simon T P, Stewart P M. Development of a stream habitat index for the Northern Lakes and Forests ecoregion. North American Journal of Fisheries Management, 2002, 22(2): 452-464.

[31] Putman J H, Pierce C L, Day D M. Relationships between environmental variables and size-specific growth rates of Illinois stream fishes. Transactions of the American Fisheries Society, 1995, 124: 252-261.

[32] 张浩, 丁森, 张远, 贾晓波, 孟伟, 郭彪 西辽河流域鱼类生物完整性指数评价及与环境因子的关系. 湖泊科学, 2015, 27(5): 829-839.

[33] 高欣, 丁森, 张远, 马淑芹, 刘思思, 孟伟. 鱼类生物群落对太子河流域土地利用、河岸带栖息地质量的响应. 生态学报, 2015, 35(21): 7198-7206.

[34] Ding S, Zhang Y, Liu B, Kong W J, Meng W. Effects of riparian land use on water quality and fish communities in the headwater stream of the Taizi River in China. Frontiers of Environmental Science & Engineering, 2013, 7(5): 699-708.

[35] Zhang Y, Zhao R, Kong W J, Geng S W, Bentsen C N, Du X D. Relationships between macroinvertebrate communities and land use types within different riparian widths in three headwater streams of Taizi River, China. Journal of Freshwater Ecology, 2013, 28(3): 307-328.

[36] Jackson E L, Attrill M J, Jones M B. Habitat characteristics and spatial arrangement affecting the diversity of fish and decapod assemblages of seagrass (*Zostera marina*) beds around the coast of Jersey (English Channel). Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2006, 68(3/4): 421-432.

[37] Boët, Belliard J, Berrebi-dit-Thomas R, Tales E. Multiple human impacts by the city of Paris on fish communities in the Seine river basin, France. Hydrobiologia, 1999, 410: 59-68.

附录 1 太子河流域鱼类物种出现频率及功能群类型

Appendix 1 Fish species appear and functional group types in the Taizi River Basin

物种名称 Family	出现频率 Occurrence frequency				功能群 Functional groups				
	森林用地 Forest	森林耕作用地 Combination of forest and farmland	耕地 Farmland	城镇用地 Urban	营养结构 Trophic guild	耐受性 Tolerance to pollution	产卵类型 Reproductive guild	底质类型 Substrate type	栖息水层 Water location
棒花鮈 *Abbottina rivularis*	0.000	0.421	0.333	0.000	杂食性	—	—	沙	中下层
棒花鱼 *Abbottina rivularis*	0.167	0.579	0.778	0.500	杂食性	耐污	筑巢产卵	淤泥	中下层
鲫 *Carassius auratus*	0.000	0.263	1.000	1.000	杂食性	耐污	黏性卵	淤泥	中下层
餐 *Hemiculter leucisculus*	0.000	0.000	0.778	0.333	杂食性	耐污	浮性卵	沙	中上层
麦穗鱼 *Pseudorasbora parva*	0.000	0.316	0.778	0.833	杂食性	耐污	黏性卵	—	中下层
东北雅罗鱼 *Leuciscus* waleckii	0.000	0.105	0.000	0.000	杂食性	—	黏性卵	石块	中上层
葛氏鲈塘鳢 *Perccottus glehni*	0.833	0.316	0.000	0.167	鱼食性	—	黏性卵	石块	底层
宽鳍鱲 *Zacco* platypus	0.000	0.684	0.444	0.500	杂食性	耐污	沉性卵	—	中上层
拉氏鱥 *Phoxinus lagowskii*	1.000	1.000	0.000	0.000	昆虫食性	敏感	黏性卵	石块	中下层
马口鱼 *Opsariichthys bidens*	0.000	0.053	0.111	0.000	鱼食性	敏感	黏性卵	石块	中上层
兴凯银鮈 *Squalidus chankaensis*	0.000	0.053	0.000	0.000	植食性	—	—	石块	
兴凯鱊 *Acheilognathus chankaensis*	0.167	0.000	0.444	0.000	植食性	敏感	黏性卵	石块	中上层
中华鳑鲏 *Rhodeus sinensis*	0.000	0.000	0.333	0.833	杂食性	—	—	淤泥	
彩鳑鲏 *Rhoaeus lighti*	0.000	0.000	0.444	0.167	植食性	敏感	特殊产卵	—	中下层
清徐胡鮈 *Huigobio chinssuensis*	0.333	0.526	0.111	0.000	杂食性	中等耐污	—	石块	中下层
花杜父鱼 *Cottus linnaeus*	0.833	0.000	0.000	0.000	植食性	敏感	特殊产卵	石块	中上层
东北七鳃鳗 *Lampetra morii*	0.167	0.368	0.000	0.000	寄生物	—	筑巢产卵	石块	底层
乌鳢 *Channa argus*	0.000	0.000	0.111	0.167	鱼食性	耐污	筑巢产卵	淤泥	底层
泥鳅 *Misgurnus anguillicaudatus*	0.000	0.579	0.667	0.667	杂食性	耐污	黏性卵	淤泥	底层
北方花鳅 *Cobitis granoei*	1.000	0.737	0.333	0.167	杂食性	耐污	黏性卵	—	底层
北方条鳅 *Nemachilus nudus*	1.000	0.842	0.111	0.167	植食性	中等耐污	黏性卵	—	底层
大鳞副泥鳅 *Paramisgurnus dabryyanus*	0.000	0.053	0.333	0.500	杂食性	—	黏性卵	淤泥	底层
纵纹北鳅 *Lefua costata*	0.000	0.105	0.111	0.167	杂食性	—	黏性卵	—	底层
裸项栉鰕虎鱼 *Ctenogobius gymnauchen*	0.000	0.053	0.111	0.000	杂食性	耐污	黏性卵	沙	底层
子陵栉鰕虎鱼 *Ctenogobius giurinus*	0.000	0.105	0.222	0.000	昆虫食性	耐污	黏性卵	沙	底层
波氏栉鰕虎鱼 *Ctenogobius cliffordpopei*	0.000	0.263	0.222	0.000	杂食性	耐污	黏性卵	沙	底层
黄鱼幼 *Hypseleotris swinhonis*	0.000	0.053	0.222	0.167	杂食性	—	—	—	底层
青鳉 *Oryzias latipes*	0.000	0.000	0.000	0.500	昆虫食性	中等耐污	浮性卵	淤泥	中上层